



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GSE 18
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

**GRUPO VIII
GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS - GSE**

**ANÁLISE DO ESTRESSE ELETROMECHANICO EM TRANSFORMADORES CAUSADOS POR CURTOS-
CIRCUITOS EXTERNOS UTILIZANDO TÉCNICAS NO DOMÍNIO DO TEMPO**

Ana Claudia de Azevedo*	Antônio Carlos Delaiba	José Carlos de Oliveira	Bismarck Castillo Carvalho
UFMT	UFU	UFU	UFMT
	Herivelto de Souza Bronzeado		
	CHESF		

RESUMO

Este artigo apresenta os resultados de uma investigação sobre os efeitos das forças eletromagnéticas que atuam nas estruturas internas dos transformadores causadas por correntes de curtos-circuitos. Os resultados foram obtidos utilizando um modelo de transformador, no domínio de tempo, baseado num circuito magnético equivalente fundamentado em forças magnetomotrizes e relutâncias. Esta forma de representação possibilita a simulação do comportamento do dispositivo tanto em condições de regime permanente quanto em regime transitório, bem como a determinação das variáveis de naturezas elétrica, magnética e mecânica. A metodologia é aplicada a um transformador de potência típico, operando em condição normal (nominal) e submetido a um curto-circuito trifásico. Para aferir os resultados do programa no domínio do tempo, estudos semelhantes foram realizados utilizando-se um programa baseado no método dos elementos finitos.

PALAVRAS-CHAVE

Forças eletromagnéticas; método dos elementos finitos; corrente de curto-circuito; modelagem de transformadores; domínio do tempo; estresse eletromecânico.

1.0 - INTRODUÇÃO

Transformadores de potência são componentes essenciais para a operação dos sistemas elétricos. Os custos unitários de tais dispositivos encontram-se entre os mais elevados, fato que exige uma atenção especial por parte das empresas proprietárias. Neste particular, além dos custos de manutenção ou substituição, devem ser levados em consideração outros aspectos que, em decorrência da falha de um equipamento, também têm impacto sobre a saúde financeira da empresa.

Durante sua operação normal, os transformadores são submetidos a esforços elétricos, térmicos e mecânicos. Os esforços mecânicos verificados nas estruturas internas deste tipo de dispositivo em decorrência das forças adicionais provocadas por elevadas correntes de curto-circuito são considerados os maiores causadores de falhas, verificadas nas partes ativas e estruturais dos transformadores.

O projeto de transformadores de potência é realizado prevendo-se as situações mais críticas a que possam ser submetidos no local destinado para sua instalação. Para assegurar a sua integridade física, os critérios de dimensionamento das partes ativas e das estruturas de sustentação dos transformadores levam em consideração as mais severas correntes de curto-circuito. Considera-se que, sob tais condições extremas, estes equipamentos sejam submetidos também às forças máximas. Apesar do extremo cuidado observado na fase de projeto, a prática tem mostrado um aumento significativo do número de falhas em transformadores. Estudos realizados em concessionárias de diversos países deixam evidente os enormes prejuízos financeiros das empresas do setor elétrico devido às falhas mecânicas [1].

(*) Av. Fernando Correa da Costa S/N, Faculdade de Arquitetura Engenharia e Tecnologia, 78060-900 Cuiabá, MT – Brasil
Tel: (+55 65) 3615-8732 – Fax: (+55 65) 3615-8781 – Email: anaclaudia.ene@gmail.com

Estas falhas podem ser atribuídas a diversos fatores, dentre os quais destacam-se os pequenos defeitos na fase de fabricação e montagem, estimativa incorreta das máximas correntes transitórias, qualidade dos materiais empregados, ferramentas e técnicas de cálculo, dentre outros.

Nesse contexto, este Informe Técnico visa contribuir para o estudo de uma das principais causas de danos em transformadores de força, utilizando um simulador que emprega técnicas no domínio do tempo para investigar as elevadas forças eletromagnéticas e conseqüentes estresses mecânicos nos enrolamentos provocados pelas correntes de curto-circuito decorrentes de defeitos nos sistemas elétricos externos ao equipamento.

O modelo de transformador utilizado se baseia no circuito equivalente para modelar dispositivos eletromagnéticos que faz uso das forças magnetomotrizes e relutâncias magnéticas, e permite a simulação de fenômenos de regime transitório e permanente. Devido às dificuldades para se obter valores de referência para validação dos cálculos, os resultados obtidos pelo simulador no domínio do tempo são comparados com resultados extraídos de uma tradicional e bem aceita ferramenta que utiliza técnicas baseadas no Método dos Elementos Finitos, conhecido com *Finite Element Method Magnetics* (FEMM) [2].

2.0 - FORÇAS ELETROMAGNÉTICAS EM TRANSFORMADORES

De acordo com a eletrodinâmica clássica, a densidade de força em um determinado volume de uma bobina é obtido pela expressão básica da força de Lorentz, a qual é calculada por (1) [3].

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (1)$$

onde $\vec{f}$ é o vetor densidade de força, $\vec{J}$ é o vetor densidade de corrente, e $\vec{B}$ é o vetor densidade de fluxo magnético de dispersão.

A Figura 1 ilustra uma distribuição típica de fluxo magnético de dispersão entre os enrolamentos de um transformador com bobinas concêntricas. Observa-se que as linhas de fluxo têm uma direção predominantemente axial em grande do espaço ao longo da altura dos enrolamentos, podendo-se considerar que somente a componente de densidade de fluxo axial está presente neste espaço. No entanto, perto das extremidades dos enrolamentos, as linhas de fluxo mudam de direção na tentativa de encurtar o caminho de retorno. Desta forma, o fluxo total de dispersão pode ser decomposto em duas componentes, uma na direção axial e outra na direção radial.

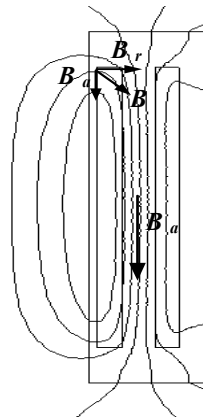


FIGURA 1 - Distribuição típica de fluxo magnético de dispersão em transformadores com enrolamentos concêntricos.

O processo de interação entre a densidade de fluxo de dispersão e da corrente nos enrolamentos em transformadores com enrolamentos concêntricos se processa da seguinte forma: a componente axial (B_a) da densidade de fluxo interage com a densidade de corrente, originando uma componente radial da força (F_r), responsável pela mútua repulsão entre os enrolamentos. A componente radial da densidade de fluxo (B_r) interage com a densidade de corrente e dá origem a uma força na direção axial (F_a), que age no sentido de comprimir/expandir os enrolamentos [4].

Em condições normais de operação as forças eletromagnéticas nos enrolamentos dos transformadores são pequenas. Nestas condições, os fluxos magnéticos concentram-se fundamentalmente no núcleo ferromagnético. No entanto, durante um curto-circuito, tanto as correntes nos enrolamentos quanto o fluxo de dispersão aumentam significativamente e, conseqüentemente, aumentam as forças que atuam nos enrolamentos [5].

É prática comum projetar transformadores para resistir ao maior pico da corrente de curto-circuito trifásica em seus terminais, considerando o equipamento conectado a um barramento infinito do sistema elétrico [4, 5]. Nesta condição, a expressão utilizada para determinar o nível máximo da corrente de curto-circuito (I_{cc}) no transformador é expressão

(2):

$$i_{cc} = \frac{k\sqrt{2}S_n 10^6}{\sqrt{3}VZ} \quad [\text{A}] \quad (2)$$

onde $k\sqrt{2}$ é o fator de assimetria da corrente de curto-circuito, S_n a potência nominal do transformador, em MVA, V a é tensão nominal fase-fase do transformador, em volts e Z é a impedância do transformador, em pu.

2.1 Cálculo da força radial

A figura 2 mostra as forças radiais resultantes nos enrolamentos de um transformador e a distribuição da densidade de fluxo de dispersão (B_a). Para simplificação, a curvatura das linhas de fluxo nas extremidades dos enrolamentos não é considerada. Dessa forma, a distribuição de fluxo pode ser considerada como sendo constante em todo o espaço entre os enrolamentos e, como consequência, a força radial por unidade de comprimento da bobina é também constante.

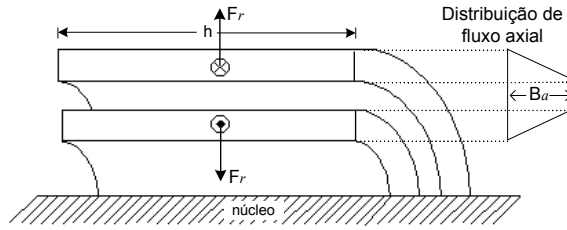


FIGURA 2 - Seção transversal de um transformador com enrolamentos concêntricos mostrando as forças radiais (F_r) e a distribuição de fluxo axial (B_a).

A densidade de fluxo magnético de dispersão na direção axial, no ponto médio entre os enrolamentos, pode ser determinada de acordo com (3), sendo ni é a força magnetomotriz nos enrolamentos.

$$B_a = \frac{4\pi(ni)}{10^4} \quad [\text{T}] \quad (3)$$

A força magnetomotriz total de cada enrolamento encontra-se imersa em uma densidade de fluxo magnético médio de $(1/2)B_a$. Dessa forma, as forças radiais atuando em cada enrolamento com diâmetro médio D_m e altura h podem ser determinadas por (4). Estas forças (Figura 3) agem de tal maneira a produzir um estresse mecânico de tração no enrolamento externo e um estresse de compressão no enrolamento interno.

$$F_r = \frac{2\pi(ni)^2 D_m}{h} 10^{-7} \quad [\text{N}] \quad (4)$$

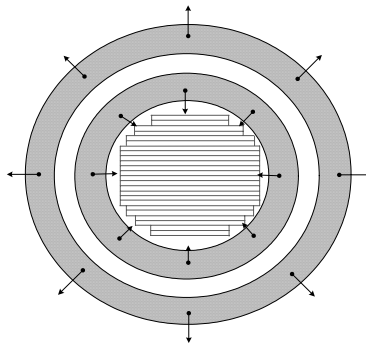


FIGURA 3 - Forças de tração e de compressão nos enrolamentos concêntricos de um transformador

Para o cálculo dos estresses de tração e de compressão (σ_{medio}) utiliza-se a expressão (5). Nesta equação considera-se que o enrolamento sob análise (interno ou externo) possua n espiras de seção transversal a_c [6]:

$$\sigma_{medio} = \frac{F_r}{2na_c} \quad [\text{N/m}^2] \quad (5)$$

2.2 Cálculo da Força Axial

A Figura 4 mostra a distribuição da densidade de fluxo radial (linhas verticais) e as forças axiais em enrolamentos com arranjos assimétricos e alturas diferentes. Essa assimetria causa uma concentração do fluxo radial na região onde o desequilíbrio de ampère-espiras ocorre [7], a qual se localiza na extremidade do enrolamento de menor altura.

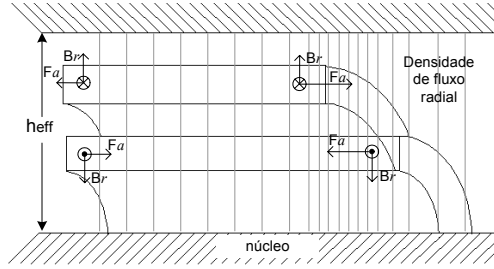


FIGURA 4 - Seção transversal de um transformador mostrando as forças axiais nos enrolamentos e a distribuição de densidade de fluxo de dispersão radial [6].

Para determinar a força axial pelo método analítico, é necessário conhecer o comprimento efetivo do caminho do fluxo radial h_{eff} , a densidade de fluxo radial B_r e o valor médio dos ampère-espiras $((1/2)ani)$, onde a é o comprimento da seção do enrolamento expresso como uma fração do seu comprimento total. Esta seção pode ser considerada como um grupo de espiras em curto-circuito ou aqueles correspondentes às derivações (tapes) no enrolamento. A densidade de fluxo radial médio será fornecido por:

$$B_r = \frac{4\pi}{10^4} \frac{a(ni)}{2h_{eff}} \quad [T] \quad (6)$$

A força na direção axial pode ser determinada de acordo com a equação (7).

$$F_a = \frac{2\pi a(ni)^2}{10^7} \frac{\pi D_m}{h_{eff}} \quad [N] \quad (7)$$

3.0 - O MODELO NO DOMÍNIO DO TEMPO

Muito embora existam diferentes formas de efetuar a modelagem de transformadores, utilizou-se nesta investigação uma representação de transformador trifásico, tipo núcleo envolvido, desenvolvida através da modelagem das forças magnetomotrizas/relutâncias utilizando, para tanto, um simulador no domínio do tempo. A escolha deste modelo é particularmente vantajosa, uma vez que permite a interação entre fluxos magnéticos nas três fases, bem como de os diversos tipos de conexão dos enrolamentos. Para exemplificar o uso do simulador, um transformador trifásico de 100 MVA, 230/138 kV, com quatro enrolamentos por fase, foi implementado. O circuito magnético equivalente do equipamento modelado está ilustrado na Figura 5.

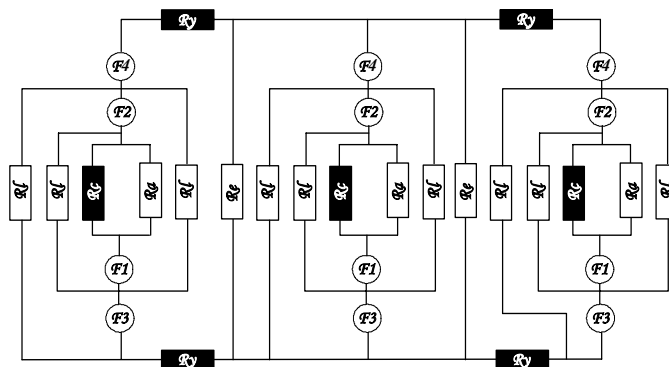


FIGURA 5 – Circuito magnético equivalente do transformador trifásico modelado.

N Figura 5, R_c e R_y (retângulos em negrito) são as relutâncias não lineares correspondentes às colunas e as culatras, respectivamente; R_a , R_i e R_e são as relutâncias lineares correspondentes, respectivamente, ao caminho de ar entre a coluna e o enrolamento interno; ao caminho de dispersão entre os enrolamentos concêntricos e, ao caminho de ar externo aos enrolamentos; F_1 , F_2 , F_3 e F_4 são as forças magnetomotrizas produzidas pelos enrolamentos.

A Figura 6 ilustra os parâmetros físicos requeridos para se determinar a área entre os enrolamentos (A_{disp}), utilizada para efetuar o cálculo do fluxo magnético de dispersão e, conseqüentemente, das componentes das forças eletromecânicas [10]. Nesta figura, l_m é o comprimento médio da circunferência do espaço entre os enrolamentos; d_1 e d_2 são as espessuras dos enrolamentos externo e interno, respectivamente, e d_0 é a espessura do espaço entre os dois enrolamentos. A área de dispersão pode ser calculada a partir da equação (8).

$$A_{disp} = l_m \left(\frac{d_1}{3} + d_0 + \frac{d_2}{3} \right) [m^2] \quad (8)$$

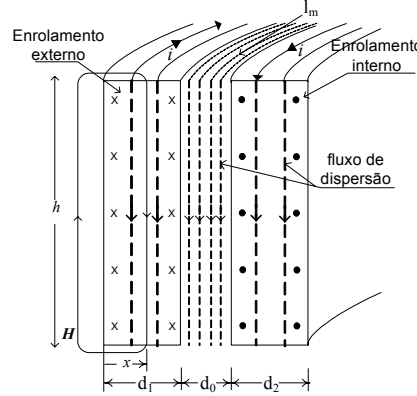


FIGURA 6 – Parâmetros utilizados para o cálculo da área de dispersão entre enrolamentos concêntricos.

4.0 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Os resultados apresentados neste Informe Técnico foram obtidos em duas situações: com o transformador operando em condição normal (carga nominal) e submetido a um curto-circuito trifásico.

6.1 Resultados no Domínio do Tempo

Os resultados das simulações para condição normal (nominal), utilizando o simulador no domínio do tempo, estão ilustrados na Figura 7. Ressalta-se que, para esta condição operativa, foi utilizada uma carga trifásica equilibrada de 100 MVA, com características puramente resistivas.

A Figura 7(a) mostra as correntes nas três fases que circulam nos enrolamentos externos (alta tensão). A Figura 7(b) mostra as densidades de fluxo magnético de dispersão nas três regiões entre os quatro enrolamentos de uma das fases. Observa-se que as três regiões possuem densidades de fluxo de dispersão diferentes, uma vez que os enrolamentos possuem características físicas e elétricas distintas. O valor máximo dessa grandeza é de 0,2 T.

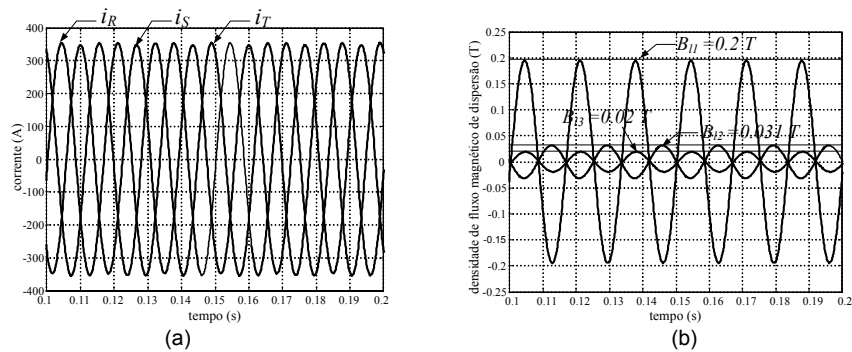


FIGURA 7 - Transformador em condição nominal de carga. (a) Formas de ondas das correntes no enrolamento externo (AT) (b) Densidade do fluxo magnético de dispersão entre os enrolamentos.

Os estudos realizados para a condição de curto-circuito foram realizados considerando os terminais da BT do transformador submetidos a um curto-circuito trifásico à terra, com duração de 100 ms. As formas de onda das correntes nos enrolamentos de alta tensão (externo) são mostradas na Figura 8(a).

A Figura 8(b) ilustra a densidade de fluxo magnético de dispersão nos espaços entre os enrolamentos concêntricos. Observa-se que o maior valor obtido para esta grandeza foi de 3,7 T, quase 20 vezes maior do que o máximo atingido na condição nominal (0,2T).

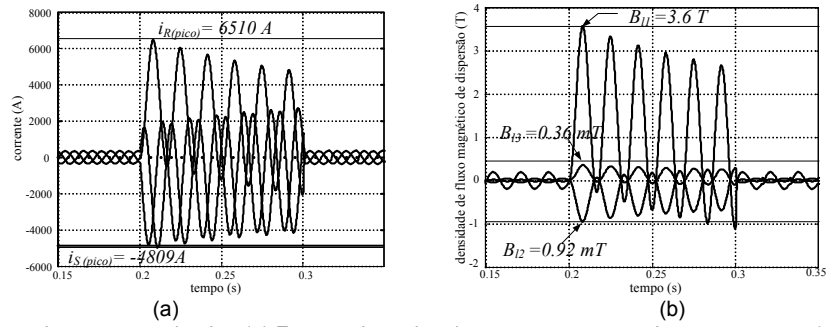


FIGURA 8 – Transformador em curto-circuito. (a) Formas de ondas das correntes no enrolamento externo (AT) (b) Densidade de fluxo magnético de dispersão.

Conhecendo-se as correntes e as densidades do fluxo de dispersão, pode-se determinar as forças radiais aplicadas aos enrolamentos, de acordo com a equação (4). Os resultados para as condições de operação normal e de curto-circuito estão mostrados nas Figuras 9 e 10 respectivamente, para os enrolamentos externos e internos. Os resultados mostram que as forças radiais para a condição de curto-circuito aumentam drasticamente, com seus picos alcançando valores de mais de 300 vezes superior às forças na condição nominal do transformador.

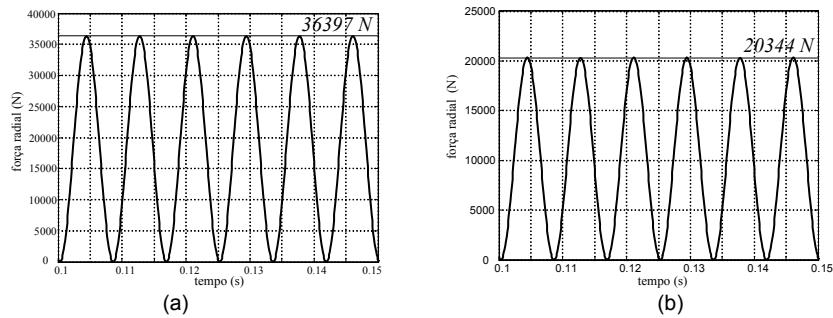


FIGURA 9 – Forças radiais no transformador operando em condição normal – (a) enrolamento externo (b) enrolamento interno.

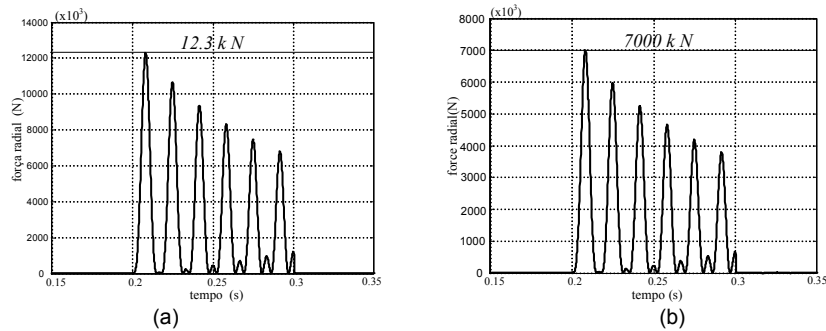


FIGURA 10 – Forças radiais nos enrolamentos do transformador em curto-circuito. (a) enrolamento externo (b) enrolamento interno.

A Figura 11 mostra o estresse mecânico (N/m^2) nos enrolamentos associado às forças radiais. O enrolamento externo está submetido a um estresse de tração, enquanto que o enrolamento interno é submetido a um estresse de compressão, ambos calculados de acordo com a equação (5).

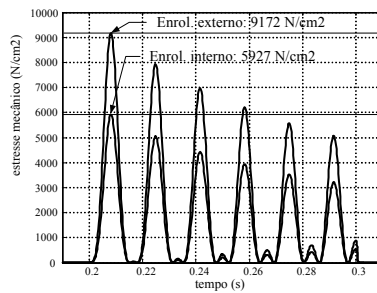


FIGURA 11 – Estresse mecânico nos enrolamentos externos e internos do transformador - condição de curto-circuito.

6.2 Resultados no FEMM

Os resultados discutidos neste item referem-se às simulações obtidas a partir do pacote computacional *FEMM*. Os valores de corrente utilizados são aqueles obtidos pela equação (2). Seguindo os procedimentos estabelecidos para aplicação do curto-circuito no programa de *FEMM*, considerou-se uma corrente de 6510 A (pico) nos enrolamentos externos (AT) e uma corrente de 11061 A nos enrolamentos internos (BT). A distribuição de fluxo no interior do dispositivo para esta condição está mostrada na Figura 12.

A Figura 13 mostra a densidade de fluxo de dispersão ao longo da altura do enrolamento de externo. Destaca-se, que durante o curto-circuito a densidade de fluxo magnético de dispersão atinge um valor de aproximadamente 3,7T, enquanto que para a condição nominal a quantidade de 0,2T.

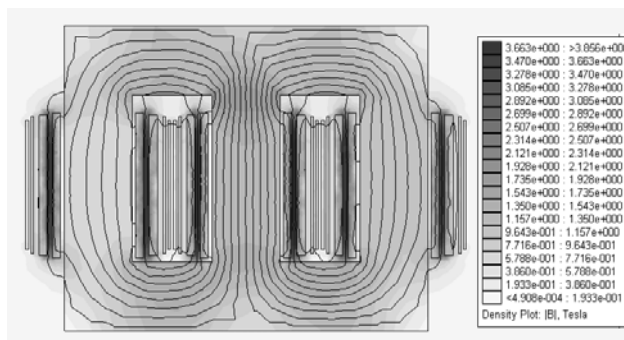


FIGURA 12 – Distribuição de fluxo magnético no interior do transformador durante um curto-circuito trifásico.

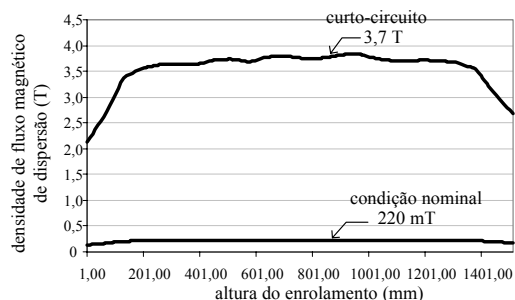


FIGURA 13 – Densidade de fluxo magnético de dispersão ao longo da altura do enrolamento.

A tabela I sintetiza os principais resultados obtidos para as simulações com o transformador em operação normal e em curto-circuito, para os dois métodos de cálculo utilizados. É importante destacar a existência de uma boa correlação entre os resultados obtidos pelos dois métodos, para ambas condições de operação. Dessa forma, considerando-se como referência os resultados obtidos pelo método de FEMM, pode-se constatar que a metodologia utilizada no domínio do tempo constitui numa ferramenta adequada para se estimar as forças radiais e os estresses mecânicos nos enrolamentos de transformadores.

TABELA I

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM O TRANSFORMADOR NA CONDIÇÃO NOMINAL E EM CURTO-CIRCUITO

Grandeza		Operação Nominal		Curto-Circuito	
		Domínio do Tempo	FEMM	Domínio do Tempo	FEMM
Densidade de fluxo magnético de dispersão [T]		200×10^{-3}	200×10^{-3}	3,5	3,6
Densidade de fluxo magnético no núcleo [T]		1,6	1,6	1,23	1,32
Força Radial [N]	Enrolamento externo	$36,4 \times 10^{-3}$	$36,9 \times 10^{-3}$	$12,3 \times 10^6$	$13,5 \times 10^6$
	Enrolamento interno	$36,4 \times 10^{-3}$	$36,9 \times 10^{-3}$	$7,0 \times 10^6$	$7,5 \times 10^6$

5.0 - CONCLUSÕES

O Informe Técnico apresentou uma análise das forças e do estresse mecânico em transformadores de potência utilizando um modelo computacional de transformadores no domínio do tempo, ao qual foram indroduzidas rotinas que permitem a determinação de grandezas mecânicas no transformador. O foco das investigações foi o estresse mecânico causado pelas correntes dos curtos-circuitos externos ao transformador, ou curto-circuito “passantes”, tendo em vista ser uma das condições mais severas para transformadores, com perda de vida e risco de danificação.

Foram realizadas simulações em um transformador de 100 MVA, 230/138 kV, tendo sido determinadas as densidades de fluxo de dispersão nos enrolamentos e as consequentes forças e estresses mecânicos envolvidos, quando aquele equipamento é submetido a um curto-circuito trifásico.

Devido dificuldades em se obter dados para aferir os resultados conseguidos com o modelo desenvolvido para cálculos no domínio do tempo, estudos semelhantes foram realizados com um programa de Elementos Finitos. Os resultados em ambos os métodos, tanto com o transformador na condição normal (nominal) quanto em curto-circuito trifásico, mostraram uma boa concordância, indicando o adequado desempenho do modelo desenvolvido.

Embora as investigações tenham sido realizadas somente para o efeito das forças radiais, o modelo desenvolvido pode ser utilizado para o cálculo dos stresses mecânicos causados pelas forças axiais em transformadores. Este assunto será objeto de estudos futuros.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Bartley, W. H. "Analysis of transformer failures", 36th Annual Conference of IMIA - The International Association of Engineering Insurers, v. 1, n. 1, p. 1 - 12, September 2003.
- [2] Meeker, D., "Finite Element Method Magnetics - User's Manual Version 3.4" [online]. (September 2006) Available: <http://femm.berlios.de>.
- [3] Yun-Qiu, T., Jing-Qiu, Q., Zi-Hong, X., "Numerical Calculation of Short Circuit Electromagnetic Forces on the Transformer Winding", IEEE Transaction on Magnetic vol. 26, No.2, March, 1990.
- [4] IEEE Guide for Failure Investigation, "Documentation and Analysis for Power Transformers and Shunt Reactors", IEEE Standard C57.125, 1991.
- [5] Heathcote, J. Martin, "J&P Transformer Book", 12th ed., Oxford, Elsevier Science Ltd, 1998.
- [6] Waters, M., "The Short-Circuit Strength of Power Transformers", McDonald & Co. Ltd, London, 1966.
- [7] The Short Circuit Performance of Power Transformers, Brochure CIGRE WG 12.19, 2002.
- [8] Apolônio, R., Oliveira, J. C., Bronzeado, H. S., Vasconcellos, A. B., "The Use of Saber Simulator for Three-Phase Non-Linear Magnetic devices Simulations: Steady-State Analysis", The 7th Brazilian Power Electronic Conference, Fortaleza, Ceará, Brazil, September, 2003, pp 524-529.
- [9] Yacamini, R., Bronzeado, H. S., "Transformer Inrush Calculations using a Coupled Electromagnetic Model", IEE Proc. Sci Meas. Technol. Vol. 141, no. 6, November, 1994, pp 491-498.
- [10] Slemon, G. R., "Magnetolectric Devices: Transducers, Transformers and Machines", 5th Ed, John Wiley and Sons, 1966.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Ana Claudia de Azevedo

Nascida em São Gonçalo do Abaeté, MG em 10 de julho de 1972.
Doutorado (2007) e Mestrado (2002) UFU - MG, Graduação (2000) em Engenharia Elétrica: UFMT- Cuiabá -MT
Empresa: Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT, desde 2007
Docente e pesquisador do Departamento de Ciência da Computação da UFMT

Antonio Carlos Delaiba

Nascido em Botucatu, SP, em 04 de agosto de 1954.
Doutorado (1997) Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Mestrado (1987) USP, São Paulo, SP e Graduação (1979) em Engenharia Elétrica: FEB- Barretos -SP
Empresa: Universidade Federal de Uberlândia – UFU, desde 1989.
Docente e pesquisador da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU.

José Carlos de Oliveira

Nascido em Itajubá, MG em 24 de agosto de 1947.
PhD (1978) University of Manchester, Inglaterra, Mestrado (1974) e Graduação (1970) Unifei, Itajubá, MG.
Empresa: Universidade Federal de Uberlândia _ UFU, desde 1982.
Docente e pesquisador da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU.

Bismarck Castillo Carvalho

Nascido em Roboré, Bolívia em 29 de fevereiro de 1956.
Doutorado (2006) e Mestrado (2002) UFU, Uberlândia, MG e Graduação (1981) UFMT, Cuiabá, MT.
Empresa: Universidade Federal de Mato Grosso desde 1985.
Docente e pesquisador do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMT.

Herivelto de Souza Bronzeado

Nascido em Remígio, PB, em 2 de abril de 1952.
MSc (1993) University of Aberdeen, Escócia e Graduação (1975) UFCG (antiga UFPB), Campina Grande, PB.
Empresa: Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF desde 1975.
Engenheiro da área de qualidade da energia elétrica e gerente de Projetos de P&D da CHESF.
Coordenador do Comitê de Estudos C4 do Cigré-Brasil e do Capítulo PES/IAS/PELS, Nordeste 1, do IEEE.